

22^{ème} Congrès Français de Mécanique

Lyon, 24 au 28 Août 2015

Déformabilité à chaud d'un four rotatif pour cimenteries

Expérimentation et simulation numérique

K. I. JANATI^a, A. DIRHAR^a, S. RAKIZ^a, L. BOUSSHINE^a

- a. Laboratoire des Technologies de Construction et des Systèmes Industriels (LTCSI),
Equipe de la Mécanique des Structures et des Matériaux (MSM), Ecole Nationale
Supérieure de l'Electricité et de la Mécanique (ENSEM)/ Université Hassan II,
Casablanca, Maroc.
Email : janati.id02@gmail.com

Résumé :

Le présent travail a pour objectif l'étude de la tenue mécanique et de la déformabilité des viroles à chaud d'un four rotatif pour les cimenteries. Cette étude entre dans le cadre des travaux de la maintenance préventive de ces fours. Il s'agit de valider les modèles éléments finis (maillage volumique et maillage volume/coque) qui simule le comportement du four en service. Dans un premier temps, une campagne de mesures expérimentales des déformations du four a été réalisée à chaud, ensuite la simulation numérique de la virole et du mur réfractaire par la méthode des éléments finis (maillage volumique) a été élaborée en utilisant le logiciel PATRAN/NASTRAN/SAMCEF. Pour une meilleure approche de la réalité du comportement du four, les résultats obtenus par la MEF sont comparés à ceux obtenus par les essais expérimentaux.

Abstract:

This work aims to study the mechanical strength and deformability of hot rotary kiln for cement. This study is part of the work of kilns preventive maintenance. This study is done to validate the finite elements models (volume mesh and volume / shell mesh) which simulate the kiln behavior in service. Initially, a companion experimental deformation measurements of the kiln was carried out in hot temperature, then the numerical simulation of wall shell and the refractory by the finite element method (volume mesh) was developed using the software PATRAN / NASTRAN / SAMCEF. For a better approach to the reality of the kiln behavior, the results obtained by the FEM are compared with those obtained by experimental tests.

Les mots clefs : Déformabilité, Ovalité, Four Rotatif, Maintenance Préventive, Briques Réfractaires, virole, simulation numérique, Patran/Nastran/Samcef.

1. Introduction

Dans le cadre de la maintenance préventive [1] une étude détaillée du four N°2 (voir fig.1) va être élaborée. Pour ce faire il est nécessaire de déterminer les ovalités des sections du four afin d'anticiper la tombée des briques réfractaires et de détecter son axe réel de rotation pour pouvoir contrer le

problème de désalignement. Ces causes influencent aussi sur les autres composants du four, par exemple les galets de guidage en rotation qui sont de l'ordre de trois comme on le voit sur la figure 1.



Fig.1 : Four rotatif N°2

L'inclinaison et la rotation du four permet le déplacement du calcaire (A) introduit à l'entrée du four (4) à travers la virole vers la sortie (5) de ce dernier sous forme de clinker (B) comme le montre la figure 3.

Pour protéger la virole du four et les éléments rapportés et pour éviter des pertes de chaleur excessives, le four rotatif est garni d'un revêtement réfractaire spécial fig.2.

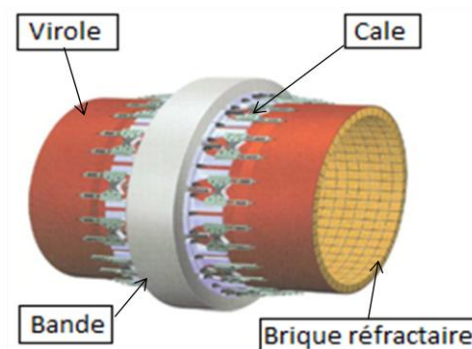


Fig.2 : La bande, la virole et les briques réfractaires

La virole se compose de plusieurs tronçons de différentes tailles, ces tronçons sont assemblés par soudage et sont revêtues par des briques réfractaires. Chaque tronçon a une épaisseur spécifique pour résister aux contraintes appliquées [2]. La nuance d'acier est choisie en fonction des contraintes thermiques escomptées. La température de service à l'intérieur du four croît au fur et à mesure qu'on s'éloigne de l'entrée, donc il est nécessaire de contrôler en permanence la température à l'extérieure de la virole au moyen d'un appareil de mesure approprié. De plus, il faut procéder à un contrôle visuel une fois par jour. La valeur de référence de la température maximale de la virole est de 350 °C. Un acier courant tel qu'il est utilisé pour les viroles du four n'a plus de résistance définie au-dessus de 350 °C.

Lors du service du four, il arrive parfois que la température dépasse la valeur limite précitée des températures excessives au niveau de la virole du four la cause réside dans un briquetage endommagé ou une couche de briquetage trop mince par suite de l'usure. Le remplacement ou la réparation du revêtement réfractaire dans les zones de températures excessives de la virole est urgent. Des différences de température sur la circonférence du four, provoquées par un croûtage unilatéral ou des

déformations de la virole suite à une tache rouge entraînent des courbures temporaires du cylindre. Il en résulte sur le four en rotation des contraintes dans la virole qui - selon le degré de courbure - peuvent croître jusqu'à un multiple de la contrainte admissible. Ces contraintes excessives peuvent provoquer une formation de fissures dans la tôle de la virole. De plus, tous les postes de roulement (bandages, galets et massifs) sont soumis à des contraintes plus importantes. Les déformations du four engendrent une excentricité de la couronne dentée et des conditions d'engrènement défavorables des pignons. En cas de courbure extrême qui persiste lorsque le four est froid, il faut prendre des mesures pour redresser le four selon son axe longitudinal. Ces mesures de remise en état doivent être réalisées uniquement par du personnel spécialisé.

2. Caractéristiques géométriques et mécaniques

2.1. Géométrie

La géométrie du four est représentée par la figure 3.

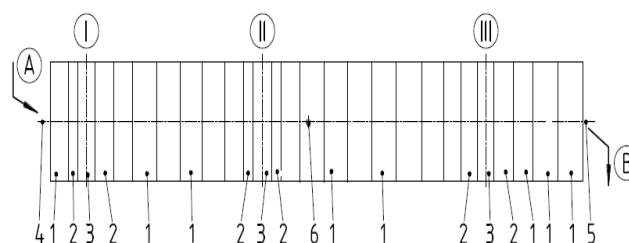


Fig.3 : Schéma simplifié du four

2.2. Matériaux

2.2.1 Matériaux de la virole

La virole du four constitué d'un métal ordinaire E24 [3], assemblées entre elles par un cordon de soudure formé d'un deuxième matériau métallique. Pour simplifier les calculs on va supposer que le matériau est partout le métal E24 dont les caractéristiques sont données par le tableau suivant :

Propriétés du matériau	Module d'Young	Coefficient du Poisson	Limite élastique	Charge de rupture
Valeurs	210000MPa	0.3	235 MPa	400 N/mm ²

Tab.1 : Caractéristiques mécanique de l'acier E24

2.2.2 Matériaux des briques réfractaires

Les briques réfractaires [4] du four sont fabriquées par un matériau dont les caractéristiques sont données par le tableau suivant :

Propriétés mécanique du matériau	Module d'Young	Coefficient du Poisson	Limite élastique	Charge de rupture
Valeurs	105000MPa	0.35	90MPa	120 N/mm ²

Tab.2 : Caractéristiques mécanique des briques

Propriété thermique du matériau	Intérieur	extérieur	Unité
Coefficient de transfert thermique	120	9.1	W/m^2K

Tab.2 : Caractéristiques thermiques des briques

3. Etudes expérimentales

3.1. Principe de la méthode de mesure

La mesure de la déformation de la virole du four se fait par un appareillage spécial [4] pour relever les différents points de la virole, un PC portable pour l'acquisition des données et un trépied qui sert de support (fig.4). Pour faire les mesures, il est primordial de se situer à tout instant vis-à-vis du four, alors on doit définir un repère global. Le rôle de ce repère est de repérer la position de la station de mesure par rapport au centre des noies ring du joint amont, utilisé comme étant le centre de la virole.



Fig.4 : L'appareil de mesure des déformations

3.2. Détermination de l'ovalisation

Pour déterminer l'ovalisation de la virole (fig.5) [5], on doit tout d'abord repérer la position de la station à l'aide d'un repère global. Ensuite, on insère l'angle de déviation de la station pour déduire la distance qui sépare un point mesuré de la virole par rapport au centre parfait. Ce centre est déterminé en prenant le milieu entre les deux galets supportant le four dans une section donnée.

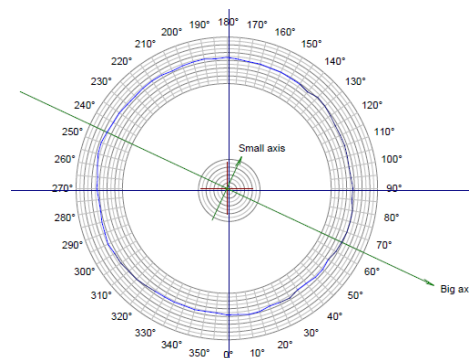


Fig.5 : L'ovalisation d'une section sur la virole

4. Simulation numérique par la MEF

L'objectif de cette étude est l'analyse du comportement mécanique de la virole du four dans le cas d'un chargement statique. Ce travail a été effectué pour l'aide à la décision relative la maintenance du four. Toutes les calculs [6] sont réalisées par les logiciels de simulation numérique par la méthode des éléments finis Patran/Nastran et Patran/Samcef. La modélisation du four se fait en définissant :

- Les dimensions du four,
- les matériaux de construction utilisés,
- les conditions aux limites et les chargements appliqués.
- Les types des éléments finis utilisés.

La figure 6 montre le modèle éléments finis adopté pour la résolution du problème.

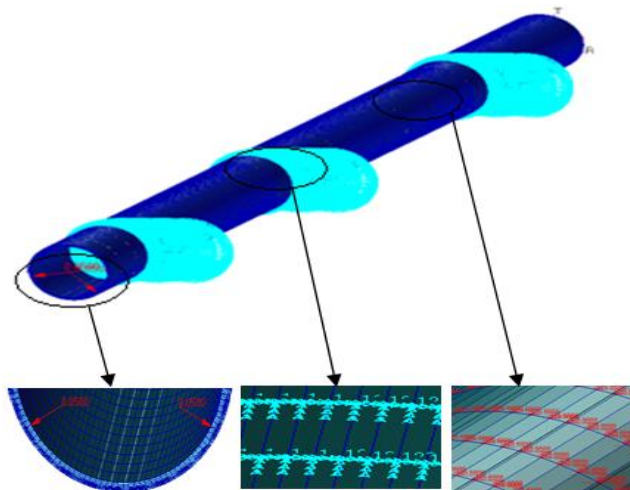


Fig.6 : Le four avec les conditions aux limites, maillage et les charges

5. Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

5.1. Comparaison des ovalisations.

On choisit une des sections de la virole du four n°1 dont nous disposons des mesures de son déplacement par la méthode expérimentale. Ensuite, on relève la valeur du déplacement de la virole obtenue numériquement pour la même section. Enfin, on compare la valeur expérimentale et numérique du déplacement maximale pour valider le modèle éléments finis.

La figure 7 représente le déplacement de la section choisie du four par Patran/Nastran.

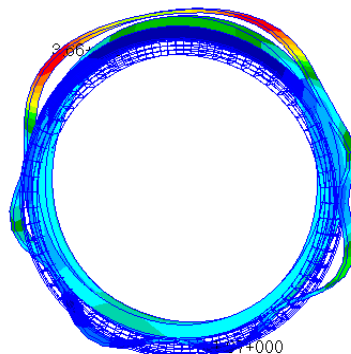


Fig.7 : L'ovalisation en avant

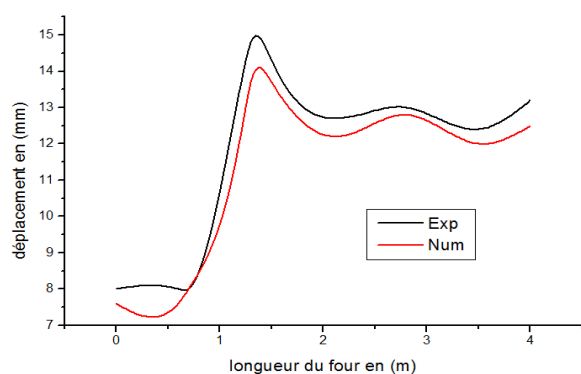
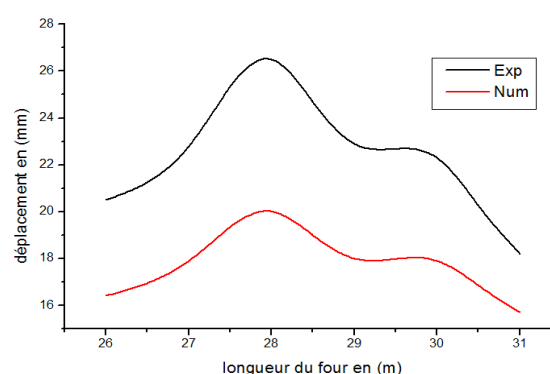
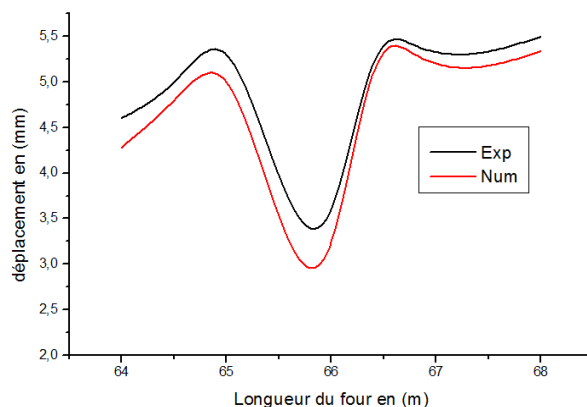
Le tableau 3 nous montre que les valeurs des déplacements maximales obtenues par la méthode expérimentale et la simulation numérique sont proches.

Abscisse 0 (Amont)	Excentricité en (mm)
Numérique	8.65
Expérimental	8

Tab.3 : Valeurs de l'excentricité

5.2. Comparaison des déplacements au long du four

On divise le four sur trois parties : en amont, au milieu et en aval. La première partie qui est l'amont du four est prise entre le début et 4m, la deuxième qui est le milieu est prise entre 26 et 31m et la troisième qui est l'aval du four est prise entre 64 et 68m. Sur chaque tronçon considéré nous allons relever le déplacement maximal obtenu par simulation numérique pour le comparer avec celui issu de l'expérience. Les figures 8, 9 et 11 regroupent les différents résultats obtenus. On remarque qu'il ya une cohérence entre les courbes obtenues avec une petite différence dans certaine zone qui est du au phénomène de la fatigue de la virole du four.

**Fig.8** : Déplacement de l'amont du four**Fig.9** : Déplacement au milieu du four**Fig.10** : Déplacement en aval du four

6. Les éléments volumiques et les éléments coques.

Dans ce paragraphe, on va mailler la virole du four par deux types d'éléments finis. On considère des éléments finis volumiques dans le premier cas et des éléments finis coques dans le deuxième pour le même four. L'objectif de cette étude est de voir la différence entre les deux types de maillage. Dans le deuxième cas, on utilise un maillage surfacique (coque) pour la virole extérieure. Le contact entre les briques réfractaires et la virole est définie comme un contact avec l'adhérence.

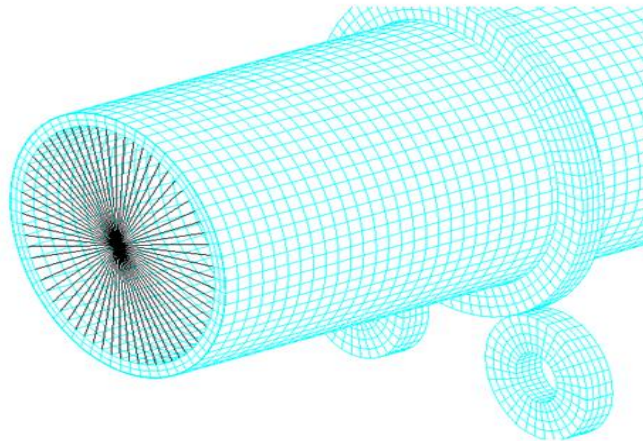


Fig.11 : Maillage du four n°2 volumique/coque.

6.1. Déformation en amont du four.

On trace les déplacements dans une section en amont du four (l'entrée) pour les deux types de maillage. Les résultats sont représentés par la figure 12. On remarque une différence entre les deux courbes dans l'angle de 90° par rapport à l'axe horizontal qui est l'angle de concentration des charges à transporter.

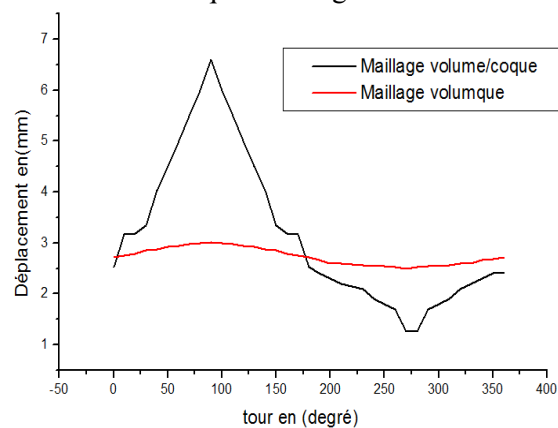


Fig.12: Déplacement en fonction de tour du four.

6.2. Déformation de bande.

On trace les déplacements dans une section de la zone la plus proche à la première bande en aval du four pour les deux types de maillage. Les résultats sont représentés par la figure 13. On remarque une différence entre les deux courbes dans l'angle de 90° par rapport à l'axe horizontal qui est l'angle de concentration des charges à transporter.

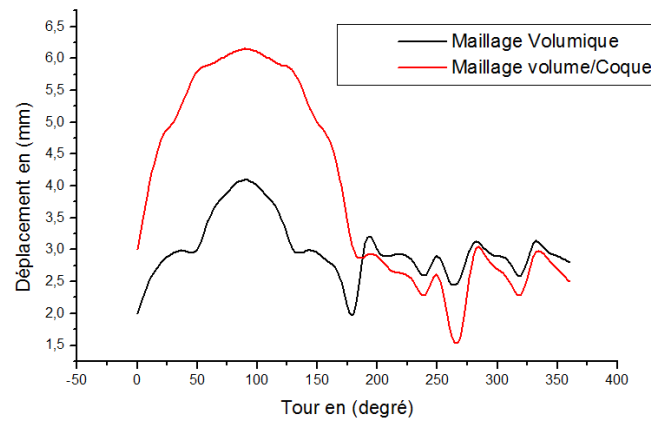


Fig.13: Déplacement en fonction de l'angle du four.

6.3. Les résultats au milieu du four.

Le graphe ci-dessous nous montre la différence des résultats obtenus par les deux types de maillage dans une section au milieu du four.

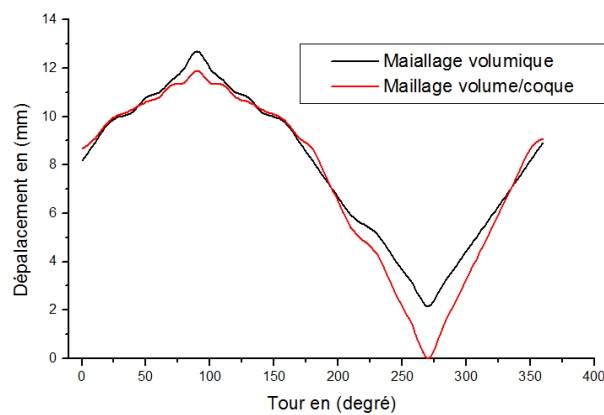


Fig.14: Déplacement en fonction de l'angle du four.

6.4. Comparaison des deux types de maillage le long du four.

Le graphe représenté sur la figure 15 montre la différence entre le déplacement maximale en fonction de la longueur du four obtenu par les deux types de maillage.

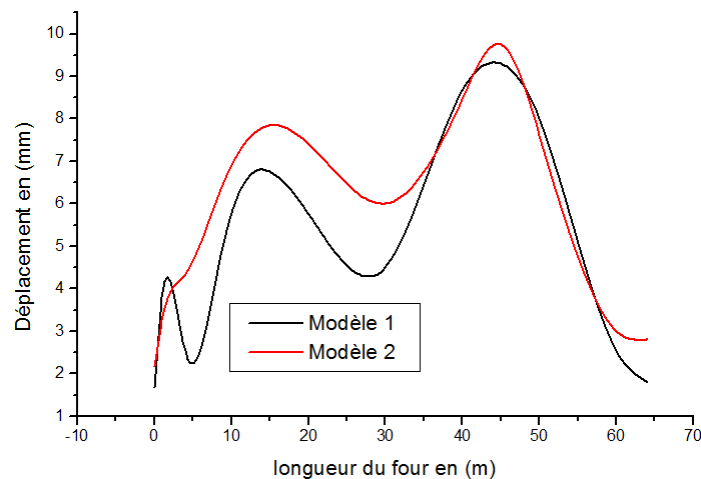


Fig.15 : Déplacement le long du four.

7. Conclusion

Une étude comparative entre les résultats expérimentaux et ceux obtenues par les simulations numériques sur trois zones critiques du four rotatif de cimenteries a été établie, on observe que les trois graphes sont proches représentés par les figures 12, 13, 14 et 15.

Comme perspective du travail effectué on propose d'inclure l'effet thermique sur le modèle en utilisant un logiciel spécial de thermique, l'objectif de ce travail est de déduire la déformation mécanique et ceci en retranchant les déformations thermiques obtenues par simulation numérique des déformations totales obtenues par les mesures et ensuite avoir une idée sur le chargement du four.

Références :

- [1] J. Levitt, Complete Guide to Preventive and Predictive Maintenance, second edition, Industrial Press Inc, New York, 1952.
- [2] K.I.Janati, S.Jalal, A.Mjidila, L.Bousshine, Limit Analysis of a S235- steel Bottle for Calor gas for domestic usage, International Organization of Scientific Research Journals, India, 2015.
- [3] J. L. Chaboche et J. Lemaitre, A. Benalal, R. Desmorat, Mécanique des matériaux solides, 3^{ème} édition DUNOD, France, Cachan, 2009.
- [4] S. Herman, A Million Little Bricks, The Unofficial Illustrated History of the LEGO Phenomenon, Skyhorse Publishing, 2012.
- [5] CODAP, code de construction des appareils à pression non soumis à l'action de la flamme, 2005.
- [6] A. Biron, P. G. Hodge, Numerical Method for Limit Analysis of Rotationally Symmetric Shells.
- [7] A. A. Boateng, Rotary kilns: transport phenomena and transport processes, ELSEVIER, 2008.
- [8] O. L. Seng, A computer program for cylindrical shell analysis, School of Mechanical and Production Engineering, Nanyang Technological Institute, Singapore, 1987, PP 131-149.